

Modificação do Projeto da Bucha e da Vedação dos Mancais das Palhetas do Distribuidor das Turbinas de ITAIPU

Autores:

Nome	Ramal	e-mail	Divisão
<João Maria Marra>	2690	marra@itaipu.gov.br	SMIM.DT
<Aldo Manuel Ramírez>	2735	aldoman@itaipu.gov.py	SMIM.DT
<Gabriel Caballero de Araújo>	2689	gsca@itaipu.gov.br	SMMU.DT

Resumo:

O projeto original dos mancais das palhetas do distribuidor e de suas vedações foi concebido com a utilização de buchas autolubrificantes do tipo Fiberglide e vedação por meio de gaxeta Nutring de borracha com lona. Embora esta opção representasse o estado da arte por ocasião de sua concepção (~1980), seu desempenho apresentou-se em curto prazo insatisfatório para o caso da vedação e limitado para o caso das buchas. Até à época da concepção do projeto de ITAIPU, os mancais das palhetas diretrizes do distribuidor das turbinas hidráulicas eram concebidos basicamente com lubrificação à graxa.

Assim sendo, o presente trabalho descreve os pontos relevantes do histórico destes componentes nas turbinas de ITAIPU quanto aos problemas técnicos apresentados e as soluções adotadas, bem como uma modelagem matemática de aspectos relevantes na montagem de buchas com interferência, seja por prensagem ou por resfriamento criogênico.

PALABRAS CLAVES

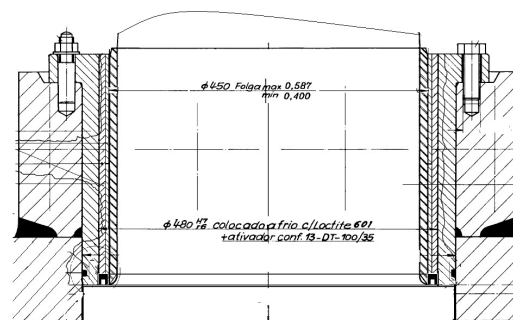
turbina Francis, cojinetes, mantenimiento.

1 - Características das Turbinas de Itaipu:

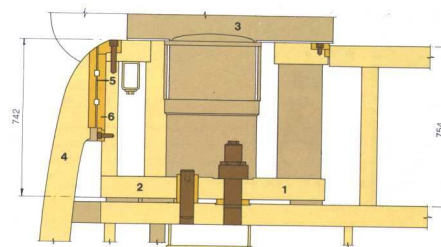
Potência nominal: 715 MW	Número de palhetas: 24
Queda líquida nominal: 112,9 m	Altura total da palheta: 4572 mm
Queda líquida de projeto: 118,4 m	Número de mancais por palheta: 3
Rotação: 90,9 rpm (50 Hz) e 92,3 rpm (60 Hz)	Tipo dos mancais: autolubrificantes
Turbina: francis vertical	Carga radial máxima na palheta: 413 t

2 - O projeto Original

De acordo com a concepção do projeto, típico para turbinas Francis vertical de alta queda, o mancal intermediário é acessível para a manutenção e o mancal inferior requer a desmontagem da turbina para intervenção no mesmo. No caso de ITAIPU, existe também o mancal superior das palhetas. No entanto, como este não está sujeito à pressão da água, não requer vedação, é acessível e apresenta desempenho satisfatório.



Mancal Intermediário



Mancal Inferior

Todos os três mancais das palhetas, inferior, intermediário e superior foram concebidos com a utilização de uma bucha postiça em bronze com espessura radial de 15 mm revestida internamente com uma lâmina de material autolubrificante, denominada Fiberglide. Estas buchas foram originalmente montadas sob interferência em uma carcaça cilíndrica de aço carbono. Tal montagem foi feita por meio de resfriamento criogênico e adição de cola na interface da bucha e da carcaça.

O *Fiberglide* utilizado, originalmente fabricado pela empresa alemã Erma-Werk, trata-se de uma lâmina de espessura de aproximadamente 0,5 mm formada por uma trama de fibra de PTFE (Teflon) fixada por meio de uma resina sobre uma tecido de poliéster. Tal composição forma uma

lâmina autolubrificante que ao ser colada sob a superfície interna da bucha dos mancais possibilitam uma operação com baixo coeficiente de atrito seco, da ordem de 0,1, e capacidade de carga específica ótima para longa vida quando abaixo dos limites de 28 N/mm² (dinâmico) e 210N/mm² (estático).

A vedação do mancal inferior e do mancal intermediário junta ao eixo das palhetas foi concebida com a utilização de uma gaxeta tipo U por mancal, sendo esta constituída por uma estrutura de lona de algodão e borracha nitrílica.

Os munhões do eixo das palhetas foram dotados de buchas postiças de aço inoxidável austenítico.

3 – Os problemas ocorridos e as soluções adotadas

Durante os primeiros cinco anos de operação das turbinas observou-se que o desempenho da vedação do mancal intermediário estava insatisfatória, levando a um contínuo trabalho de bombeamento da água oriunda do vazamento por esta vedação e consequente elevado gasto de mão de obra para sua substituição, devido a necessidade de desmontagem do bielismo superior do eixo da palheta para que a substituição da gaxeta inteiriça pela extremidade superior do eixo da palheta.

Assim sendo, ainda nos anos 80, a Manutenção iniciou-se a implantação de modificação no projeto da vedação do mancal intermediário, visando a aumentar sua eficiência e vida útil. Tal modificação consistia na implantação de rasgos radiais na carcaça na região de apoio da gaxeta de modo, possivelmente para reduzir o esforço radial da gaxeta sobre o eixo de forma a minimizar os danos que esta vinha apresentando, conforme foto a seguir, e aumentar sua vida útil.

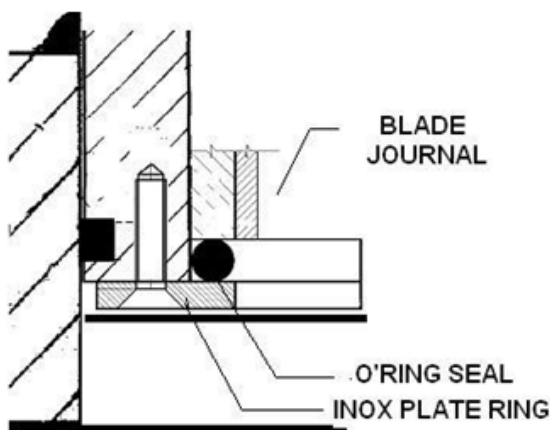


Tendo em conta que por volta do ano de 1995 observava-se um agravamento do problema de vazamento pelo mancal intermediário e vida útil insuficiente da correspondente vedação, bem como de descolamentos das lâminas do Fiberglide, expondo o munhão a uma contato direto metal-metal com a bucha de bronze, a Manutenção iniciou novo esforço para solucionar o problema. Embora o projeto mecânico de ITAIPU pudesse naquela época ainda ser considerado ‘jovem’, a tecnologia já dispunha de alternativas consideradas de melhor qualidade para tais aplicações.

Não obstante, para o caso da vedação do mancal intermediário, a Manutenção fez a opção de utilizar de forma ‘inovadora’ a utilização de anel de borracha para tal vedação, apesar da aplicação não ser um caso de vedação estática típica para a utilização deste tipo de vedação. Apesar deste inconveniente, tal solução foi implantada nas 18 primeiras turbinas e encontra-se ainda em operação e com resultados considerados satisfatórios, com vida útil média de 6 anos e máxima de 8 anos. Apesar da vida útil estar abaixo do que as vedações mais modernas proporcionam, a redução da

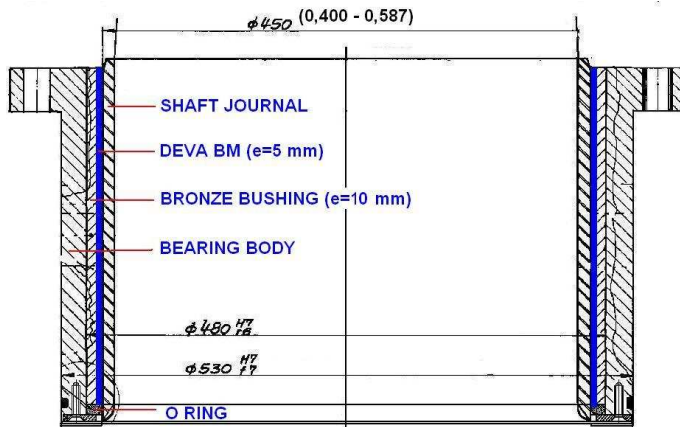
mão de obra necessária na manutenção reduziu de aproximadamente 48 HH para 8 HH com relação à manutenção da vedação original em gaxeta.

Para que tal solução ‘heterodoxa’ pudesse ser utilizada com desempenho satisfatório optou-se por utilizar borracha nitrílica macia, dureza 50 Shore A. De forma a viabilizar a implantação do anel de borracha fez-se necessária uma modificação na carcaça, de forma a se implantar um sobreposta para suportar a nova vedação. Tal modificação na carcaça consistiu no rebaixamento de sua altura e posterior complementação com um anel bipartido em aço inoxidável. Desta forma, as futuras substituições desta vedação poderiam ser feitas sem a necessidade de desmontagem do bielismo superior da palheta, pois, além da sobreposta ser bipartida o anel era montado ‘aberto’, colando-se apenas preventivamente a união de topo da emenda de suas extremidades. A seguir apresenta-se um desenho e uma foto da modificação feita na vedação do mancal intermediário das Uns 01 a 18.



Em decorrência de diversos problemas observados com o Fiberglide no mancal intermediário, principalmente o descolamento das lâminas e a exposição dos munhões ao contato direto aço-bronze e da proposta comercial e técnica feita em 1996 pela fabricante original do Fiberglide (Erma-Werks) ter sido considerada inferior frente ao produto DEVA BM ofertado vantajosamente pela também empresa alemã Federal Mogul, decidiu-se adotar esta linha de buchas autolubrificantes para substituição paulatina no mancal intermediário das palhetas de acordo com a necessidade. Tal decisão abrangeu aspectos técnicos, comerciais, estratégicos e econômicos. Atualmente mais de 30% das buchas Fiberglide dos mancais intermediários já foram substituídas por buchas Deva BM.

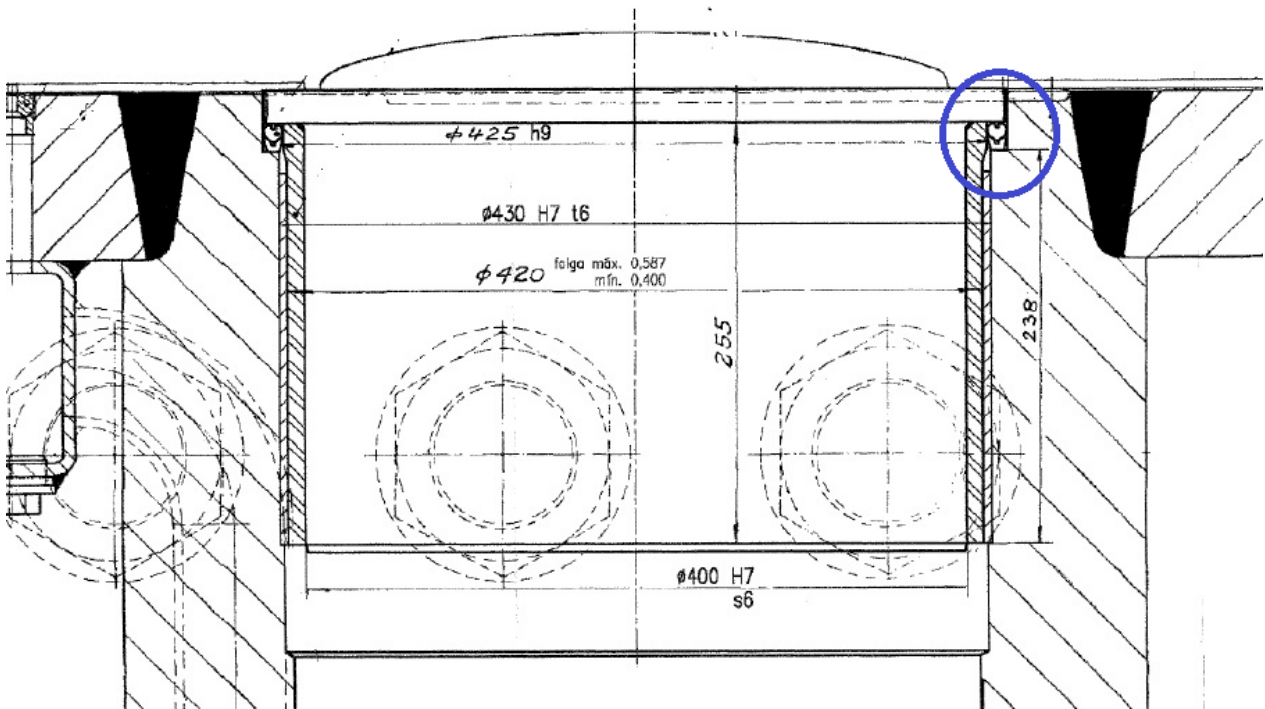
X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012



O produto DEVA BM é considerado de qualidade superior e foi originalmente utilizado no projeto das turbinas 01-18 da ITAIPU nas arruelas espaçadoras das talas do mecanismo do distribuidor. Para a implantação das buchas DEVA BM não foi necessário a remoção e descarte das buchas de bronze utilizadas como base para o Fiberglide. Assim sendo, fez-se apenas um rebaixamento do diâmetro interno destas buchas para a medida 460 H7, montando-se dentro destas as buchas DEVA BM por meio de prensagem sob interferência do ajuste H7/r6. De forma a evitar sobrecarga em partes do mecanismo do distribuidor, as folgas originais dos mancais com os munhões foram preservadas.

4 – Aplicação no projeto das Uns 9A/18A e no reparo do sinistro da U06

Diante da possibilidade de se obter melhores resultados buscou-se no projeto das duas novas unidades geradoras (9A/18A) reavaliar e implementar nestas unidades a melhor opção tecnológica disponível. Assim sendo, optou-se por adotar nestas unidades, tanto para os mancais intermediários quanto para os inferiores das palhetas, uma vedação em EPDM formada por duas peças, conforme figura a seguir referente ao mancal inferior. Com relação às buchas para os mancais das palhetas adotou-se a linha DEVA BM para todo o mecanismo do distribuidor. Após 7 anos de operação não se observa anormalidades nesta solução.



Atualmente o fabricante das buchas DEVA BM, dispõe também de uma linha alternativa para tal aplicação, porém com preços semelhantes. Tal linha baseia-se na deposição de PTFE (teflon) sobre uma base metálica. Sabendo-se que o teflon é ‘inimigo da água’ e o grafite (DEVA BM) é ‘amigo’ da água e que o desempenho destes mancais (grafite e teflon) depende da formação de um filme (pátina) do autolubrificante sobre o munhão, a falha da vedação do mancal pode impedir a formação deste filme. Caso isto ocorra na fase inicial da operação ou posta em serviço da unidade geradora o desempenho dos mancais em PTFE pode atingir níveis insatisfatórios de desempenho.

5 – Aplicação no reparo do sinistro da U06

Em 2011, em função do sinistro ocorrido na turbina da U06 set/2010, esta teve que ser desmontada, proporcionando assim uma oportunidade inédita de se avaliar, após 23 anos de operação, o desempenho do projeto original do mancal inferior das palhetas (Fiberglide) e de sua vedação (gaxeta U de lona e borracha). As observações feitas indicaram um desempenho insatisfatório das buchas e da vedação dos mancais inferiores, levando a consequências como o desgaste dos munhões e até ao macaqueamento das palhetas contra a tampa da turbina, conforme observa-se nas fotos seguintes.



O arraste de material das palhetas contra a tampa da turbina indicado na figura anterior ocorre em diversas turbinas da ITAIPU, mesmo com a folga entre estes sempre presente valor normal durante os controles periódicos. Assim sendo, este desgaste até então não havia sido diagnosticado corretamente na ITAIPU. Durante a desmontagem da turbina U06 observou-se que as lâminas do Fiberglide descoladas dos mancais inferiores obstruíam os furos de alívio de pressão abaixo das palhetas, fenômeno muito comum para projetos com lubrificação a graxa, o que não é o caso na ITAIPU. Com a obstrução destes furos, a atuação da pressão hidráulica produz um empuxo sob as palhetas que supera seu peso próprio, forçando-a trabalhar em seus mancais de contra-escora. Assim sendo, após o desgaste destes superar a folga entre a palheta e a tampa ocorre o contato entre estas peças e o decorrente arraste de material.



Considerando que o peso próprio da palheta é de 76470 kgf e que o diâmetro do munhão inferior da palheta é de 420 mm, a pressão necessária para produzir um empuxo que supere o peso próprio é de aproximadamente 5,5 Bar. Assim sendo, para qualquer abertura do distribuidor, a pressão na região do distribuidor seria suficiente para produzir um empuxo acima do peso da palheta sempre que seu correspondente furo de alívio esteja obstruído.

Durante o reparo da U06, aproveitou-se o diagnóstico do roçamento entre a tampa de as palhetas devido ao entupimento dos furos de alívio e verificou-se na U12, que apresentava severos arrastamentos de material, a contra-escora das palhetas já estavam desgastadas. Para tanto, verificou-se por meio de relógios comparadores e por içamento da palheta pela talha da monovia que o deslocamento era superior à folga entre a tampa e as palhetas, indicando que os mancais de contra-escora estavam desgastados. Contudo, salienta-se que não houve êxito na verificação do desgaste das contra-escoras empurrando-se a palheta para cima por meio de uma macaco colocado sobre a tampa da turbina. Nesta condição, provavelmente a deformação na tampa provocada pelo apoio do macaco ‘mascarava’ a verificação da folga da contra-escora. Em função da confirmação do desgaste das contra-escoras procedeu-se à substituição, inédita até então na ITAIPU, de todos os mancais de contra-escora das palhetas do distribuidor da U12, prevenindo-se contra o prosseguimento dos roçamentos entre palhetas e tampa da turbina, mesmo com furos de alívio de pressão entupidos.

Assim sendo, no reparo da U06 adotou-se o mesmo projeto da 9A/18A para as buchas dos mancais e para suas correspondentes vedações. No caso do mancal intermediário, em função das modificações realizadas anteriormente nestes elementos teve-se que fazer algumas recomposições para que o novo projeto da vedação pudesse ser aplicado. Para tanto, o alojamento da antiga gaxeta

foi recuperado pela soldagem do anel postiço instalado quando da instalação da vedação em O-ring e enchimento das ‘meias-canais’ radiais por resina Devcon para bronze. Erosões por corrosão também foram recuperadas por soldagem, restabelecendo o alojamento original. A figura seguinte ilustra esta etapa.



Na figura seguinte pode-se observar o resultado final desta recomposição, já com a nova vedação em EPDM (duas peças) e bucha Deva BM.



6 – Avaliação da interferência das buchas Deva e das condições de montagem por prensagem ou resfriamento criogênico

Tendo em conta que as buchas Deva BM têm uma abertura axial e que uma interferência excessiva com seu alojamento tende a provocar um ‘arrebamento’ desta junta e também uma redução de seu diâmetro interno, porém deve possibilitar um travamento suficiente contra o giro da bucha em sua condição de carregamento mais extremo. Considerando que a interferência recomendada pelo fabricante das buchas é dada pelo ajuste H7/r6, segue na tabela seguinte procedimento de cálculo, baseado nas buchas do mancal intermediário, visando verificar a adequabilidade deste ajuste, bem como estimar a força de prensagem necessária para a montagem das mesmas em seu alojamento.

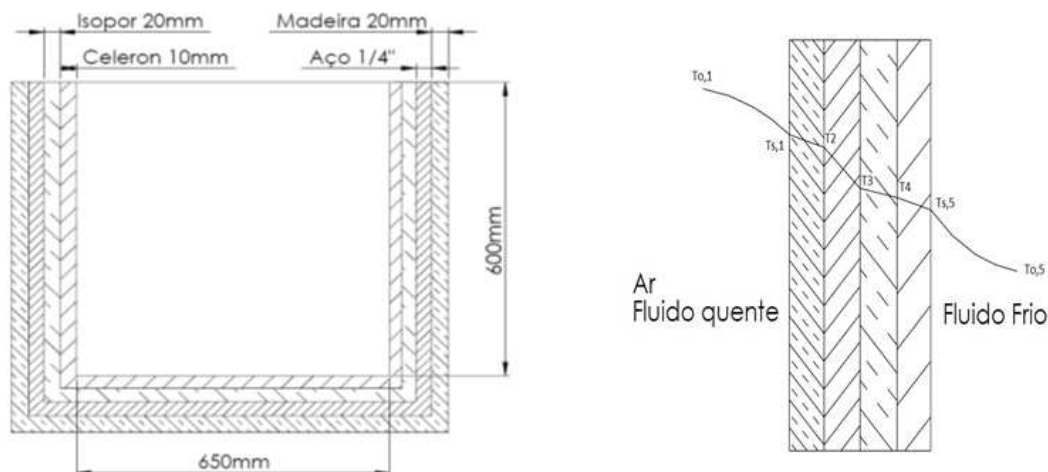
Parâmetro	Equação	Resultado
Pressão radial do munhão	5215-DF-71028	18,8 N/mm ²
Força radial	Fr = pA = P . Π.D	131 t
Força tangencial	Ft = μc . Fr	μc . 131
Pressão na interface	$P_i = \frac{\mu_c \cdot F_t}{\mu_i \cdot A}$	$P_i = \frac{\mu_c \cdot 131000}{\mu_i \cdot \pi \cdot 46 \cdot 15,5} = \frac{\mu_c}{\mu_i} \cdot 58,5 = 13 \frac{kgf}{cm^2}$
Relação dos atritos	$\frac{\mu_c}{\mu_i}$	$\frac{0,1}{0,45}$

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

Interferência radial requerida	$\Delta R = \frac{P_i^2}{e_{aço} \cdot E_{aço}} + \frac{P_i^2}{e_{bronce} \cdot E_{bronce}}$	$\frac{13.23^2}{0,5.2,1 \times 10^6} + \frac{13.23^2}{1,0.1,0 \times 10^6} = 0,013 \text{ cm}$
Interferência diametral	$\Delta D = 2 \cdot \Delta R$	$0,026 \text{ cm} = 0,26 \text{ mm}$
Interferência máx Ajuste H7/r6	ISO	0,172 mm
Pressão de contração na interferência H7/r6	$\frac{0,172}{2} = \frac{P \cdot 23^2}{0,5.2,1 \times 10^6} + \frac{P \cdot 23^2}{1,0.1,0 \times 10^6}$	$P = 83,2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Força de prensagem	$F_a = \mu_i \cdot P_i \cdot \Pi \cdot D \cdot L$	$0,1 \cdot 83,2 \cdot \pi \cdot 46 \cdot 15,5 = 18,6 \text{ t} \text{ (p/ } \mu_i = 0,1)$ $0,045 \cdot 83,2 \cdot \pi \cdot 46 \cdot 15,5 = 8,3 \text{ t} \text{ (p/ } \mu_i = 0,045)$

Com base nos valores da tabela anterior pode-se inferir que o travamento obtido com o ajuste H7/r6 fica um pouco abaixo do requerido para a condição mais extrema, porém ainda aceitável diante das condições conservativas assumidas. No entanto, deve-se controlar as dimensões das buchas do estoque e cuidar para que a usinagem do furo na tolerância H7 fique entre o afastamento mínimo e médio da medida nominal. Forças de montagem abaixo de 8t sujeitam à ocorrência de giro da bucha.

No caso do mancal inferior das palhetas, as buchas Deva BM para a U6 foram adquiridas já montadas em estojos (carcaças) de aço inoxidável. Assim sendo, optou-se por instalar estes conjuntos em seus alojamentos no anel de base da turbina por meio de resfriamento criogênico. Para tanto, optou-se pelo uso do nitrogênio líquido. Para possibilitar a montagem mais econômica foi feito um dimensionamento térmico da caixa utilizada para o resfriamento das buchas e do consumo de N2 requerido.



Parâmetro	Dados/Equação		Resultado
Estojo das buchas AISI 302	d= 420 mm D=450 mm L=238 mm $\rho=8055 \text{ kg/m}^3$	$c_p=480 \text{ J/kg.K}$ $k=15,1 \text{ W/m.k}$ $\alpha=3,91 \times 10^6$	

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

Nitrogênio	$\rho=808 \text{ kg/m}^3$ $c_p=308,36 \text{ J/kg.K}$	$h_v=199,1 \text{ kJ/kg.K}$ $T=-196 \text{ }^\circ\text{C}$	
Caixa térmica	$h_1=2 \text{ W/m}^2\text{K}$ $k_{aço}=60,5 \text{ W/m.K}$ $l_{aço}=1/4''=6,35 \text{ mm}$ $k_{isopor}=0,042 \text{ W/m.K}$ $l_{isopor}=20 \text{ mm}$ $k_{celeron}=0,59 \text{ W/m.K}$	$l_{celeron}=10 \text{ mm}$ $k_{madeira}=0,14 \text{ W/m.K}$ $l_{madeira}=20 \text{ mm}$ $A_s=1,225 \text{ m}^2$ $h_4=308,36 \text{ W/m}^2\text{K}$ $C_1=1,0311$ e $\phi=0,4328$	
Coeficiente global de perda de calor da caixa térmica	$U = \frac{1}{R_{tot} \cdot A} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_1} \right) + \left(\frac{l_{madeira}}{k_{madeira}} \right) + \left(\frac{l_{aço}}{k_{aço}} \right) + \left(\frac{l_{isopor}}{k_{isopor}} \right) + \left(\frac{l_{celeron}}{k_{celeron}} \right) + \left(\frac{1}{h_4} \right) \right] \cdot A}$		$UA = 0,88 \text{ W/K}$
Perda pela caixa	$q = UA\Delta T$		$0,88 * 1,225 * 80 = 86,3 \text{ W}$
Volume da bucha	$V = \frac{\pi(D^2 - d^2)L}{4}$		$= 6,5 * 10^{-3} \text{ m}^3$
Massa da bucha	$m_b = V \cdot \rho$		52 kg
Massa de N2 por bucha	$m_{N2} = \frac{m_b \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot 1,5}{h_v} = \frac{52 * 480 * 80 * 1,5}{199,1 * 10^3}$		15 kg
Massa total de N2 (24 buchas)	$m_{N2total} = 15 * 24$		361 kg
Volume de N2	$V_{N2} = \frac{m_{N2}}{\rho} = \frac{361}{808}$		0,446 m³
Tempo para resfriar 80 K	$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = C_1 \cdot e^{-\phi t^2}$		68 s





7 – Conclusões

A experiência de ITAIPU com as buchas e vedações dos mancais das palhetas permite concluir o seguinte:

- a) A substituição da vedação original em gaxeta U de lona e borracha por vedação em O-ring melhorou o atendimento desta função e proporcionou um melhor aproveitamento da vida útil do Fiberglide;
- b) Estima-se que a vedação em EPDM utilizada nas unidades 6, 9A e 18A represente um avanço na melhoria desta vedação e da vida útil das buchas que convivem com esta novo tipo de vedação;
- c) As buchas Deva BM representam uma melhoria com relação às buchas Fiberglide com relação à vida útil e preservação dos munhões das palhetas e das folgas recomendáveis para o mecanismo do distribuidor;
- d) O roçamento e arrastamento de material entre a tampa da turbina e as palhetas devido ao entupimento dos furos de alívio de pressão abaixo do mancal inferior das palhetas pode ser evitado pelo controle da folga dos mancais de contra-escora das palhetas. Assim sendo, é possível conviver com esta anormalidade sem a necessidade de desmontagem da turbina para corrigir tal anormalidade.